

Спектр собственных частот здания книгохранилища – достаточно плотный со сгущениями (табл. 1). Низкие значения собственных частот являются следствием большой массы сооружения и деформируемости основания.

При сейсмических воздействиях перемещения характерных узловых точек соизмеримы с перемещениями от собственного веса.

Общая устойчивость каркаса и местная устойчивость его элементов обеспечена при всех заданных нагрузках и воздействиях.

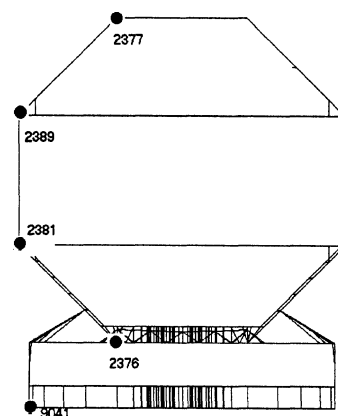


Рис. 3. Расположение контрольных узлов

Таблица 2

Перемещения узлов каркаса, мм

Номера узлов	2377			2381			2376			9041		
Направления перемещений	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Собственный вес	-68,6	1,41	-169,3	-29,7	0,56	-168,9	-14,0	0,48	-165,8	-0,08	-0,08	134,7
Временная нагрузка (вар. 1)	-69,2	2,01	-89,1	-30,1	0,91	-89,0	-14,1	0,63	-87,1	-0,12	-0,04	-67,6
Ветер по Y + пульсация	-0,72	-23,0	-3,52	-0,76	-10,5	-8,85	-0,22	-5,18	-3,36	-0,18	0,26	-6,7
Толчок по X (1-я форма)	-0,32	-7,8	-1,21	-0,19	-3,53	-3,02	-0,09	-1,73	-1,15	-0,05	-0,07	-2,28
Толчок по Y (1-я форма)	-8,69	-210,6	-32,7	-5,1	-95,2	-81,6	-2,3	-46,7	-31,1	-1,32	-2,0	-61,5
Толчок по Z (1-я форма)	0,0	-0,08	-0,01	0,0	-0,04	-0,023	0,0	-0,02	-0,01	0,0	0,0	-0,02

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия.** СНиП 2.01.07-85. – М.: Гос. ком. СССР по делам строительства, 1986. – 36 с.

2. **Перельмутер А. В., Сливкер В. И.** Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – Киев: Сталь, 2001. – 597 с.

3. **Строительные нормы и правила. Строительство в сейсмических районах.** СНиП II-7-81\*. – М.: Минстрой России, 1995. – 53 с.

УДК 624.138.24

## ОБОСНОВАНИЕ СХЕМЫ РАСЧЕТА ЖЕСТКОГО ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ С УСИЛЕННЫМ ОСНОВАНИЕМ

Канд. техн. наук, доц. БАБАСКИН Ю. Г.

Белорусский национальный технический университет

Цементобетонные дорожные покрытия имеют ряд преимуществ по сравнению с покрытиями других типов. Прочность материала таких покрытий практически не зависит от изменения температуры окружающей среды и скорости нагружения при воздействии автомобилей. Бетонные покрытия имеют высокую жест-

кость при изгибе, малую величину вертикальных упругих деформаций под нагрузкой, высокую распределяющую способность. Для работы бетонных покрытий характерны следующие особенности. В связи с высоким модулем упругости цементобетона при изменениях температуры в нем возникают значительные темпе-

ратурные напряжения, уменьшить которые можно путем создания так называемых температурных швов. Наличие часто расположенных поперечных швов ухудшает условия движения автомобилей с точки зрения комфортности, приводит к неоднородности дорожной одежды по прочности. Повышенная чувствительность поверхностного слоя бетона к воздействию антигололедных солей в процессе эксплуатации дороги вызывает «шелушение» поверхности, образование выбоин. Температурные напряжения и дефекты основания приводят к образованию поперечных и продольных трещин. Все это в совокупности отражается на сокращении срока службы цементобетонных дорожных покрытий.

В Республике Беларусь имеется 1771,966 км дорог различной категории с цементобетонным покрытием, т. е. около 5 % дорог с твердым покрытием. Основопологающим фактором при разработке и реализации технической политики в дорожной отрасли является необходимость поддержки на должном уровне существующей сети автомобильных дорог. По результатам диагностики установлено, что 62 % автомобильных дорог не соответствуют нормативным требованиям. Создавшаяся ситуация усугубляется ростом интенсивности движения и постоянным увеличением нагрузок на дорожные покрытия.

При конструировании бетонных покрытий на автомобильных дорогах руководствуются основными положениями, изложенными в пособии П1-98 к СНиП 3.06.03–85. Современная жесткая дорожная одежда состоит из покрытия, выравнивающего слоя, основания и его дополнительного слоя. Основания под цементобетонное покрытие устраивают для уменьшения давления на подстилающий грунт от движущихся автомобилей. На дорогах I и III категорий для основания используют каменные материалы или грунты, укрепленные цементом и другими неорганическими вяжущими, II и III категорий – щебень, шлак и грунты, укрепленные органическими вяжущими.

В 1998 г. итальянская фирма «Тодини» завершила модернизацию 234 км автомобильной дороги I категории М1/Е30. Ремонт заключался в: восстановлении герметизации швов; заделке разрушений сколов углов и краев плит, выбоин, кромок плит вдоль швов и трещин; устройстве слоев асфальтобетона. Герметизация производилась с использованием герметика немецкого производства, обеспечивающего хорошую адгезию к бетону. Для ремонта плит применяли импортный быстротвердеющий материал на цементной основе, а также асфальтобетонную смесь. Для защиты цементобетонно-

го покрытия от дальнейшего разрушения было принято решение постепенно наращивать слои из асфальтобетона. Вначале устраивали выравнивающий слой толщиной 2 см, который должен был играть роль трещинопрерывающего, а затем укладывали верхний слой толщиной 4 см.

Предварительное обследование асфальтобетонных покрытий позволило установить наличие поперечных трещин и разрушение верхнего слоя асфальтобетона. С целью повышения трещиностойкости покрытия было принято решение увеличить толщину покрытия из асфальтобетона на 1 см, т. е. устраивать равной 7 см. С целью предотвращения появления отраженных трещин над поперечными швами цементобетонного покрытия в верхнем слое асфальтобетона через две-три плиты были нарезаны поперечные швы с их последующей герметизацией. Все это свидетельствует о больших затратах, направленных на устранение трещин и улучшение эксплуатационного состояния покрытия. Однако дальнейшее наблюдение показало появление отраженных трещин как на участках, где швы не устраивались, так и на участках, где они устраивались, причем их количество на участках без швов значительно больше, чем на участках со швами. У 8 % нарезанных швов появились отраженные трещины на расстоянии 10...50 см от шва [1].

Возникновение отраженных трещин в асфальтобетонном покрытии связано с воздействием как температурных напряжений, так и напряжений от транспортной нагрузки. Влияние транспортной нагрузки подтверждается большим количеством отраженных трещин на участках, имеющих значительную грузонапряженность. Было установлено, что под действием нагрузки в основании цементобетонного покрытия непосредственно под поперечным швом образуется полость, достигающая в длину до 30 см и более или область разуплотненного грунта. Прогрессированию образования пустот способствует эрозия укрепленного цементом и золой основания, которое под действием природно-климатических факторов теряет свою несущую способность.

Исследованиями Н. П. Пузыревского [2], Н. М. Герсегованова и других ученых установлено, что если нагрузка приложена к поверхности грунта, то даже при малых давлениях по краям загруженной полосы возникают зоны пластических деформаций, достигающие поверхности грунта. По мере увеличения нагрузки эти зоны возрастают, приближаются к оси симметрии и, наконец, при некотором значении внешней нагрузки сливаются. В этот мо-

мент под подошвой нагруженной полосы возникает замкнутое ядро, в пределах которого сохраняется упругое напряженное состояние. Другими словами, в местах соединения дорожных плит, т. е. по швам, возникают зоны пластических деформаций, которые способствуют образованию пустот, приводящих к просадке плиты при наезде колеса автомобиля.

Для устранения этого явления предлагается усиливать места возникновения швов и трещин областями закрепленного грунта, которые не допустят возникновения пластических деформаций в основании дорожной конструкции.

Н. П. Пузыревский предложил грунтовые основания рассматривать как упругое полупространство. Эта модель стала основной, хотя и довольно сложной. Ее упрощение привело к созданию еще трех моделей оснований М. М. Филоненко-Бородича, П. Л. Пастернака и однослойной модели В. З. Власова. Эти модели занимают промежуточное место между коэффициентом постели и моделью упругого полупространства. Р. И. Бляхман [3] получил решение для моментов и перерезывающих сил в бесконечной пластине, лежащей на упругом инерционном основании и загруженной движущейся, равномерно распределенной вдоль прямой линии вертикальной нагрузкой.

Конструкции усиления цементобетонных покрытий выбраны исходя из условия ограничения зон пластических деформаций. Анализ прогибов и напряжений в упругих плитах, лежащих на упругом винклеровском основании, позволяет установить следующее:

1. При проезде двухосных автомобилей по цементобетонным покрытиям с эксплуатационными скоростями нужно принимать последовательное воздействие осей за единый ударный процесс. На покрытиях с малой жесткостью воздействие осей следует рассматривать как независимое.

2. Прогибы дорожных одежд уменьшаются с ростом скорости движения автомобилей, но при достижении 50 км/ч они несколько увеличиваются за счет динамического эффекта.

3. Динамические напряжения при изгибе от однократного приложения нагрузки в 400 Н достигают на ровных покрытиях от 1,0 до 3,6 МПа, на неровных – 1,3...5,0 МПа, развиваясь в очень короткое время.

4. Предельные динамические прогибы покрытий составляют 0,1...0,15 мм для нагрузки 400 Н на колесо и скорости 70 км/ч.

Произведем расчет упругих прогибов дорожных конструкций, подтверждающих усиление несущей способности основания областями грунта, закрепленного способом инъекти-

рования. Для этого выберем три сравнительных варианта:

- дорожная цементобетонная плита на упругом однородном основании;
- плита, лежащая на таком же упругом основании, но по краям опирающаяся на области укрепленного материала, прочность которого в 5...6 раз больше, чем грунт основания (рис. 1а);
- плита, полностью опирающаяся на основание из укрепленного материала, прочность которого в 5...6 раз больше прочности грунта земляного полотна, дополнительно опирается на области укрепленного грунта с прочностью, равной прочности укрепленного материала (рис. 1б).

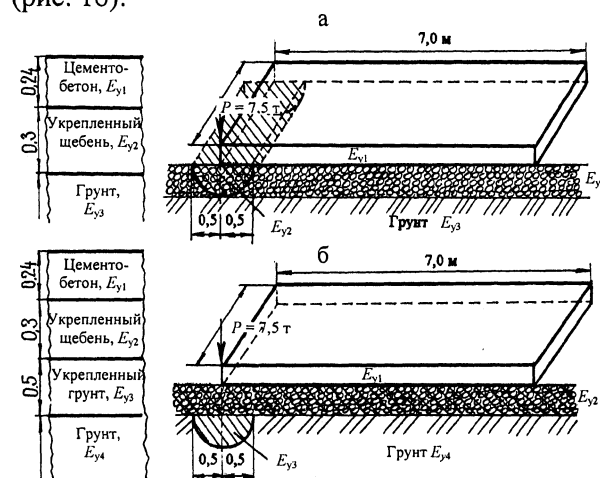


Рис. 1. Расчетные схемы: а –  $E_{y1} = 30000$  МПа;  $E_{y2} = 700$ ;  $E_{y3} = 130$ ;  $E_{y4} = 350$ ; б –  $E_{y1} = 30000$ ;  $E_{y2} = 700$ ;  $E_{y3} = 700$ ;  $E_{y4} = 130$  МПа

На схеме (рис. 1б) учитываем особенности, связанные с тем, что трещины, возникшие в дорожных плитах, имеют свойство копирования и в основании, и получается как бы плита на плите, где верхней является дорожная цементобетонная плита, а нижней – укрепленный грунт по габаритам, равный верхней плите. Эти две плиты по краям опираются на области укрепленного грунта, по прочности равные прочности нижней плиты и расположенные симметрично ее края.

Параметры, необходимые для расчета:

- размер прямоугольной плиты постоянного сечения;
- величина вертикальной силы и собственный вес плиты;
- плотность и модуль упругости материала плиты;
- коэффициент Пуассона.

Расчет выполнен для двух оснований, каждое из которых состоит из двух слоев:

- верхнего – неукрепленное и укрепленное основания толщиной 0,3 м с модулями упругости  $E_y = 350$  МПа и  $E_y = 700$  МПа;

- толщина нижнего слоя определялась как разность глубины деформируемой области основания и толщины верхнего слоя. В проведенных расчетах глубина деформируемой толщины принималась равной 2 м.

Расчет производился при наиболее невыгодном расположении временной колесной нагрузки, когда колесо находилось на углу плиты или в середине крайнего сечения.

Для расчета плиты на упругом основании использован метод конечных элементов. Модель плиты (рис. 2) сложена из 84 конечных элементов квадратной формы (0,5×0,5), которые квалифицируются в инструкции программы «Lira» как элементы типа 11. Толщина всех конечных элементов принималась одинаковой и равной 0,24 м. Предлагалось, что плита однородная, и поэтому модули упругости всех конечных элементов, складывающих саму плиту, задавались одинаковыми. Прямоугольные конечные элементы соединялись друг с другом и с конечными элементами других типов шарнирно.

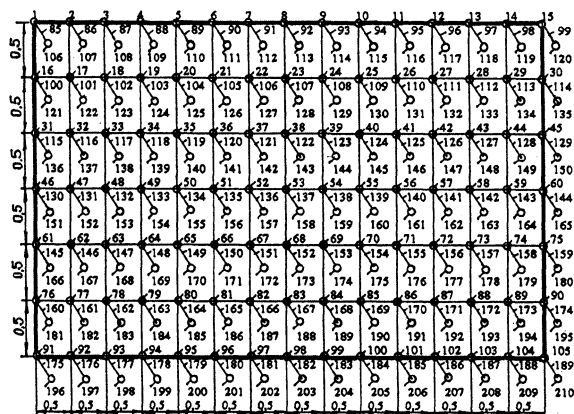


Рис. 2. Конечно-элементная модель плиты

Поскольку плита на концах опирается на области укрепленного материала или грунта, основание принимаем как неоднородное. Моделирование неоднородного в плане основания осуществлялось конечными элементами в форме вертикальных прямолинейных стержней, квалифицируемых в инструкции к программе «Lira» как элементы типа 4. Площадь поперечного сечения устанавливалась по условию равенства осадки основания и деформации конечного элемента. Элементы типа 4 нижним краем закреплены в абсолютно жесткой опоре, а верхним – шарнирно прикреплены к узлам соединения конечных элементов типа 11. При-

нятая конечно-элементная модель плиты на упругом основании содержит 105 конечных элементов, вся модель – 210 узлов и прикреплена к опоре 630 связями и имеет 630 степеней свободы. Каждый узел модели, независимо от того, какого типа конечные элементы он соединяет, имеет шесть степеней свободы. В соответствии с инструкцией программы «Lira» использована правая система координатных осей. Оси  $X$  и  $Y$  расположены в плоскости плиты, а ось  $Z$  – перпендикулярно к ним. Каждой степени свободы присвоен соответствующий порядковый номер. Линейные перемещения по направлению оси  $X$  – 1,  $Y$  – 2,  $Z$  – 3, условные перемещения относительно оси  $X$  – 4,  $Y$  – 5,  $Z$  – 6.

Расчеты выполнены для плит с плотностью бетона 2,8 и 2,4 т/м<sup>3</sup>. Вес плит при этих плотностях составляет 14,112 и 12,096 т. Следовательно, вес любого некрайнего конечного элемента составлял 0,168 и 0,144 т. На узлы, расположенные на краю плиты, прикладывалась сила, равная половине веса одного конечного элемента – 0,084 и 0,072 т. Узлы в углах плиты загружались силами, равными одной четверти веса одного конечного элемента, 0,042 и 0,036 т.

Поскольку основание моделируется конечными элементами типа 4, жесткость этих элементов устанавливалась по условию равенства осадки основания и деформации конечного элемента по упрощенной формуле

$$E_s = \frac{E_1 l_1 + E_2 l_2 + E_3 l_3}{l_1 + l_2 + l_3} A_0,$$

где  $E_s$  – жесткость конечного элемента типа 4;  $A_0$  – расчетная площадь, соответствующая узлу; для узлов в средней части плиты – площадь конечного элемента типа 11; для узлов, расположенных на краю плиты, – половина площади конечного элемента типа 11; для узлов на углах плиты – четверть площади конечного элемента типа 11;  $E_1$ ,  $E_2$  и  $E_3$  – модули упругости слоев основания, счет слоев начинается с верхнего слоя;  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  – толщины слоев основания.

Для расчета прямоугольной плиты использована проектирующая система несущих конструкций строительных объектов «Lira», разработанная НИИАСС (версия 1).

Кроме цифровых результатов, получены эпюры осадок при загрузке плиты сосредоточенной нагрузкой, приложенной в углу плиты (точка 1) и посередине большей из сторон плиты (точка 8). Результаты расчета прямоугольной плиты на различных основаниях под-

твердили наличие максимальных осадок под углом плиты, к которому приложена сосредоточенная нагрузка. На основании численных значений прогибов построены эпюры осадок (рис. 3).

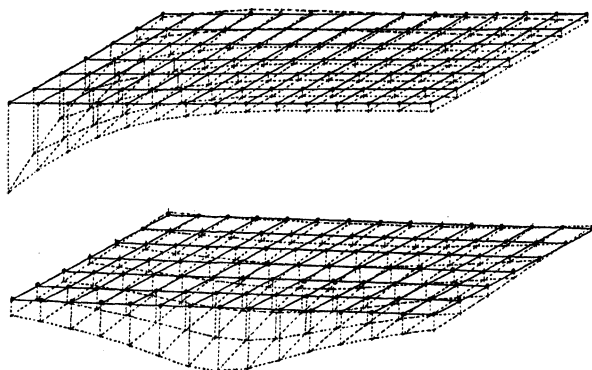


Рис. 3. Эпюры осадок при различном приложении нагрузки к плите

Таблица 1

Максимальные осадки плиты при различных вариантах устройства основания

Вариант устройства основания	Параметры расчета		
	$\rho = 2,8 \text{ г/см}^3$ ; $\nu = 0,3$		$\rho = 2,8 \text{ г/см}^3$ ; $\nu = 0,23$
	Приложение нагрузки		
	точка 1	точка 8	Точка 1
Верхний слой – неукрепленный щебень; нижний – ПГС	$\frac{3,2028}{100}$	$\frac{1,3601}{42,5*/100**}$	$\frac{3,1477}{98,3/100}$
Верхний слой – укрепленный щебень; нижний – ПГС	$\frac{3,0331}{94,7}$	$\frac{1,3279}{41,5/97,6}$	$\frac{2,9829}{93,1/94,7}$
Верхний слой – укрепленный щебень; нижний – укрепленная ПГС	$\frac{2,2775}{71,1}$	$\frac{1,1165}{34,8/82,1}$	$\frac{2,2454}{70,1/71,3}$

\* – значение, выраженное в % по отношению к максимальной величине в точке № 1;

\*\* – значение, выраженное в % по отношению к максимальной величине при данном приложении нагрузки.

Анализируя результаты осадки для плиты (табл. 1), отличающиеся по удельному весу и коэффициенту Пуассона, можно отметить, что плита с меньшим удельным весом имеет меньшую осадку. Этот факт объясняется тем, что уменьшение удельного веса отразилось на

общем весе плиты. Кроме того, расчетные данные показали, что в некоторых узлах отрицательные результаты осадки сменяются на положительные. Это свидетельствует о приподнятии данных узлов над плоскостью основания, что подтверждает факт колебания плиты.

Таким образом, на основании проведенных расчетов можно заключить, что усиление дорожного основания путем создания областей местного укрепления в сечении возникновения трещины или под поперечными швами уменьшает поперечные осадки плиты. Расчет упругих прогибов, проведенных по трем моделям, представляющим собой цементобетонную плиту, лежащую на упругом неоднородном основании и приложении нагрузки на углу плиты и посередине крайнего сечения показал, что устройство укрепленной области в основании уменьшает упругую деформацию.

Рассмотренные модели, включающие области укрепленного грунта, и математическое решение этих моделей позволяют выполнить технико-экономическое обоснование способа усиления бетонных конструкций путем устройства основания из укрепленного грунта без разрушения бетонного покрытия. Кроме того, устройство областей укрепленного грунта под любыми трещинами (продольными, поперечными) позволит создать фундамент в основании, обеспечивающий устойчивое положение отдельных частей плиты, разделенных трещинами. В этом случае герметизация верха трещины позволит получить единую конструкцию без дальнейшего развития трещины, что отразится на повышении качества ремонтных работ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Яромко В. Н. Применение новых дорожных технологий при модернизации автомобильной дороги Брест – Минск – граница России // Строительство и эксплуатация дорог и мостов: Сб. науч. докл. – Мн.: БелдорНИИ, 2001. – С. 12–35.
2. Пузыревский Н. П. Фундаменты. – Л.; М.: Госстройиздат, 1934. – 516 с.
3. Бляхман Р. П. О колебаниях бесконечной пластинки, лежащей на упругом полупространстве, под действием движущейся нагрузки в условиях плоской задачи. – М., 1967.